

Вукман В. Бакић*, Милада Ј. Пезо,
Жана Ж. Сивановић, Марија М. Живковић

Лабораторија за термотехнику и енергетику,
Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Техничка анализа хибридног енергетског система фотонапон/ветар за производњу електричне енергије

Стручни рад
УДК: 502.21:66.011/012

У овом раду је анализиран интегрисани хибридни систем коришћењем методе динамичке симулације. Основни параметри предложеног хибридног система су: површина фотонапонских панела и ветрогенератор. Техничка анализа је урађена за типичну метеоролошку годину за град Београд. Коришћен је комерцијални рачунарски програм TRNSYS 16. Применом методе динамичке симулације добија се процена добијене количине енергије из обновљивих извора. У овом раду такође је анализирано смањење емисије CO₂ за размајране енергетске системе.

Кључне речи: хибридни систем фотонапон/ветар, динамичка симулација, TRNSYS

Увод

Енергетске залихе угља, нафте и природног гаса у свету се значајно смањују. Потребне за енергијом се повећавају, а самим тим и цене ових енергената у последњих неколико година расту. Претпоставка је да у будућности залихе фосилних горива неће моћи да задовоље потребе светске популације за енергијом. Такође, коришћењем ових извора енергије јављају се проблеми загађења животне средине и повећање емисије гасова стаклене баште. Применом обновљивих извора енергије, пре свега сунчеве енергије и енергије ветра ови се проблеми могу ефикасно решити.

Хибридни енергетски системи се састоје од два или више извора енергије, контролора и опреме за складиштење вишка енергије. Примена енергије ветра и Сунца за добијање електричне енергије која би се користила у домаћинству има одређене предности: бесплатна је и доступна, не загађује животну средину (смањење емисије гасова стаклене баште – GHG), спада у обновљиве изворе енергије и доприноси одрживом развоју.

* Одговорни аутор; електронска адреса: bakicv@vinca.rs

У овом раду је анализиран самосталан хибридни енергетски систем за производњу електричне енергије за домаћинства заснован на динамичкој симулацији. Анализа је спроведена коришћењем рачунарског програма *TRNSYS*. *TRNSYS* је програм за симулацију прелазних процеса са модулрном структуром. У оквиру овог програма се налази библиотека у којој су компоненте које су обично садржане у обновљивим енергетским системима.

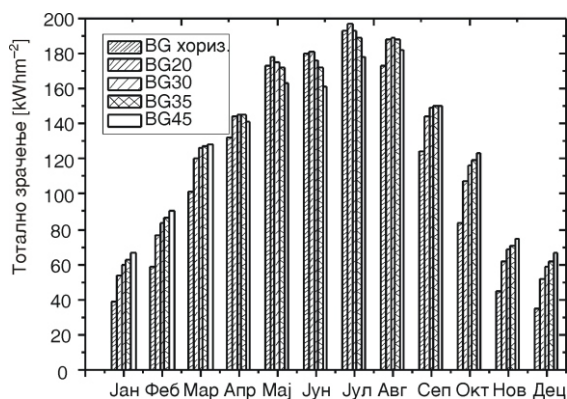
До сада су у литератури рађене бројне анализе потенцијала сунчеве енергије и енергије ветра за различите локације и предложени су, анализирани и оптимизирани одговарајући хибридни енергетски системи. *Nema et al.* [1] се бавио анализом тренутног стања у пројектовању, раду и управљању самосталних хибридних солар–ветар енергетских система. Такође је наглашен и будући развој ових система, као и потенцијали за повећање економске исплативости оваквих система и њихово прихватање од стране корисника. Предложено се развијање два система: самосталног хибридног система и система који ће у случају недостатка електричне енергије користити вишак складиштене енергије из мреже. *Arribas et al.* [2] је предложио нови приступ у мерењу, прикупљању података и анализи хибридних енергетских система солар–ветар. Коришћен је стандард IEC-61724 за системе и додат је ветар. Овај пројекат је примењен на пројекат CLOPS, за хибридни систем фотонапонске снаге 5 kW и снаге ветра 7,5 kW инсталиран на CEDER (Сорна, Шпанија). Рађен је мониторинг система током целе године и у раду су показани резултати овог мониторинга, као и карактеристике одређених делова система. *Celik* [3] је радио техно-економску анализу система коришћењем методе различитог димензионисања. Оваква оптимизација треба да узме у обзир истовремено анализу степена самосталности система и трошкова. Уобичајено је да се анализа, која укључује сунчеву радијацију и брзину ветра обавља за најгори могући сценарио, тј. за најнеповољнији месец. Предложено је увођење трећег извора енергије уместо повећања капацитета постојећег система. *Dhrab et al.* [4] је у свом раду предложио систем фотонапон/ветар који би требало да обезбеди довољне количине електричне енергије за нека места у руралним областима. Такође је одређена и територија у којој су најбољи услови за добијање соларне енергије и енергије ветра.

Количина расположиве енергије сунца и ветра у региону Београда

Соларна енерџија

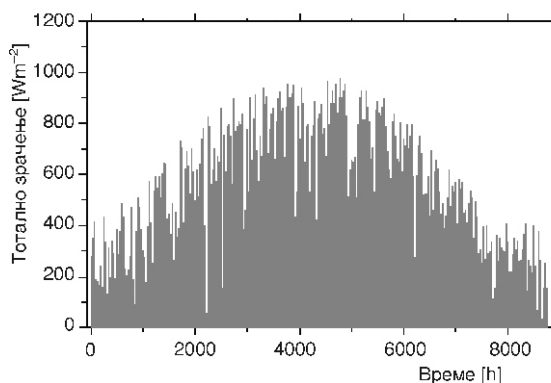
Количина сунчеве енергије која је доступна је основни податак који је потребан за планирање и пројектовање соларног енергетског система. Уместо тренутних вредности количине сунчеве енергије занима нас укупна количина енергије која доспе до јединице површине (састоји се од ирадијације и енергије зрачења) у одређеном временском интервалу (час, дан, месец, година). Ова количина енергије зависи од географске ширине, годишњег доба, оријентације и нагиба површине панела и метеоролошких прилика. Пошто је сунчево зрачење предмет многих утицаја, процене енергије зрачења само на основу теоријско-емпиријских једначина не могу имати довољну прецизност. Да би се дошло до јаснијих закључака, морају да се ураде анализе дуготерминских (вишегодишњих) мерења.

Процена расположиве сунчеве енергије се добија на основу података за нагиб површине, а на основу чињенице да енергија која се добија на одређеној површини зависи од нагиба и оријентације према Сунцу. Позиција површине која је изложена сунчевом зрачењу је веома значајна за примену. Прецизнија процена расположиве сунчеве енергије у Београду и могућности његове примене се добија коришћењем софтверског пакета *METEONORM*. Овај софтвер има базу у којој користи податке мерења временских услова на сваки сат за одговарајућу метеоролошку станицу. Количина добијене енергије од сунчевог зрачења током године за угао панела од 0–45° је приказана на сл. 1.



Слика 1. Тотално зрачење током године за различите нагибне углове

Тачност прорачуна битно зависи од промене температуре околине, брзине ветра и интензитета сунчевог зрачења. Дакле, за детаљнију симулацију су неопходни подаци о промени параметара на сваки сат. Промена интензитета тоталног сунчевог зрачења по сату и у години је дата на сл. 2.



Слика 2. Промена интензитета тоталног сунчевог зрачења на хоризонталној површини за типичну метеоролошку годину у Београду

За ову анализу коришћен је програм *TRNSYS version 16*. *TRNSYS* располаже са више модела за одређивање укупне добијене соларне енергије на нагнутим површинама. За ову анализу је коришћен модел 5-параметара [5, 6]. Динамичка симулација је рађена за фотонапонски панел нагнутим под углом од 20°. Количина сунчеве енергије која је расположива на нагнутој површини се касније користила за добијање количине електричне енергије која се може генерисати коришћењем фотонапонског панела.

На тржишту се може наћи велики избор панела различитих произвођача. Цене ових панела зависе од снаге панела и крећу се од око 3 до 6 EUR/W. У овом раду је коришћен панел *BP 2150s* (150 W). *BP 2150s* панел који се састоји од 72 сегмента и

пројектован је за мале и велике системе. Количина електричне енергије која се добија коришћењем *BP 2150s* панела, на површини од 1,254 m² по месецима је дата у табл. 1.

Табела 1. Количина електричне енергије за *BP 2150CPV* панел

| Месец | Јан. | Феб. | Мар. | Апр. | Мај | Јун | Јул | Авг. | Сеп. | Окт. | Нов. | Дец. |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| kWh _e | 8,46 | 12,5 | 20,2 | 24,2 | 29,8 | 30,2 | 33,0 | 31,3 | 24,0 | 17,8 | 9,92 | 8,11 |

Енергија ветра

У Београду постоје две метеоролошке станице које поред низа метеоролошких података прикупљају податке о смеру и брзини ветра. Метеоролошка станица Београд-Сурчин је изабрана, јер даје детаљне и квалитетне податке који су прихватљиви за анализу. Брзина ветра се мери на сваки сат на висини од 10 m. Моделирање вертикалног профила ветра (промена брзине ветра по висини) се заснива на теорији граничног слоја примењеној на атмосферске услове. У табл. 2 је дата просечна брзина ветра за различите месеце у Београду, на различитим висинама, заснована је на теоријском раду *Von Karman*-а (1).

Таблица 2. Просечне брзине ветра у Београду на различитим висинама

| Месец | Јан. [ms ⁻¹] | Феб. [ms ⁻¹] | Мар. [ms ⁻¹] | Апр. [ms ⁻¹] | Мај [ms ⁻¹] | Јун [ms ⁻¹] | Јул [ms ⁻¹] | Авг. [ms ⁻¹] | Сеп. [ms ⁻¹] | Окт. [ms ⁻¹] | Нов. [ms ⁻¹] | Дец. [ms ⁻¹] |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10 m | 3,20 | 3,44 | 3,96 | 3,78 | 3,02 | 2,93 | 2,55 | 2,48 | 2,85 | 3,06 | 3,14 | 3,15 |
| 15 m | 3,45 | 3,70 | 4,26 | 4,06 | 3,24 | 3,15 | 2,75 | 2,67 | 3,06 | 3,30 | 3,37 | 3,39 |
| 20 m | 3,63 | 3,89 | 4,48 | 4,28 | 3,42 | 3,32 | 2,89 | 2,81 | 3,22 | 3,47 | 3,55 | 3,57 |

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

За идеалне граничне услове, вредност α је приближно 0,14. Међутим, у реалним условима, вредност константе α се константно мења и зависи од различитих фактора који утичу на интензитет турбуленције. Просечна брзина ветра је добијена за $\alpha = 0,18$.

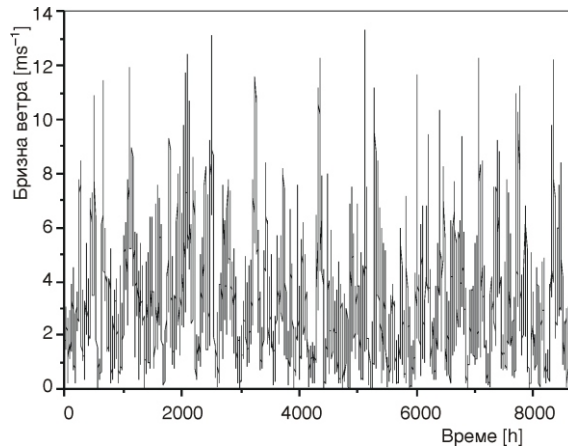
Најмања вредност брзине ветра при којој је економски исплативо коришћење ветрогенератора је око 3,1 m/s [7]. У табл. 3 је приказана добијена електрична енергија од различитих ветрогенератора на висини од 20 m за типичну метеоролошку

Таблица 3. Добијена електрична енергија од различитих ветрогенератора (висина – 20 m)

| Bergey Windpower 1 kW | Westwind 3 kW | Westwind 5 kW |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 983 kWh _e | 1840 kWh _e | 3930 kWh _e |

годину. По препоруци произвођача висина стуба ветрогенератора мора бити виша од 18 m [8]. Добијена количина електричне енергије за разматране ветрогенераторе приказана је у табл. 3.

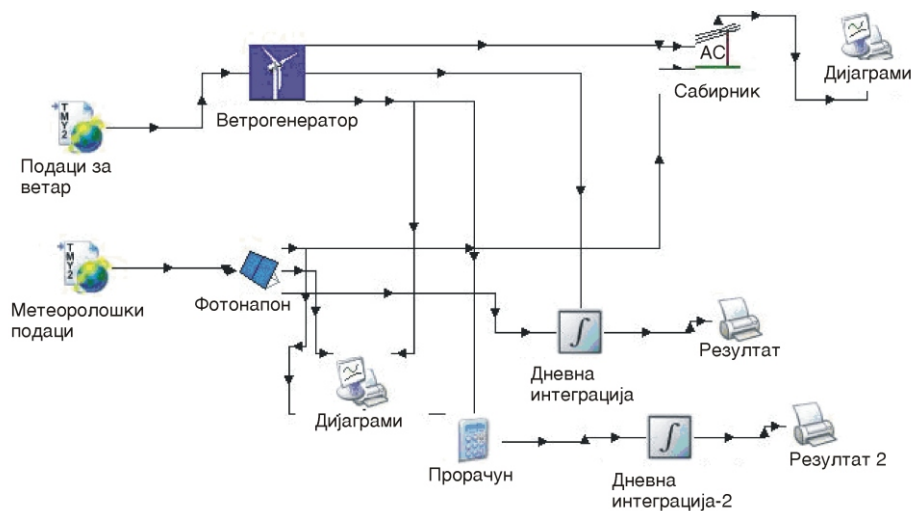
У многим земљама у свету, домаћинства и предузећа која користе мале ветрогенераторе добијају пореске олакшице. Многе државе нуде додатне подстицаје олакшице [9]. Цена ветрогенератора од 1 kW са додатном опремом је око 8000 \$.



Слика 3. Промена интензитета брзине ветра по часу за типичну метеоролошку годину у Београду

Модел динамичке симулације

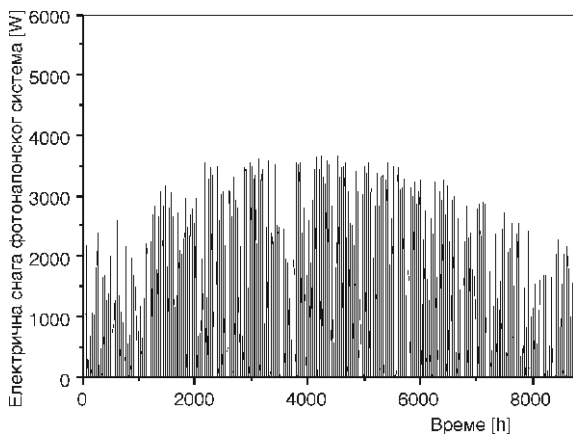
Шема хибридног система фотонапон/ветар за производњу електричне енергије је дата на сл. 4. Све приказане компоненте комбинованог система су представљене одговарајућим математичким моделима у виду диференцијалних и алгебарских једначина. Симултаним решавањем ових једначина могу се добити промене свих физичких величина који карактеришу хибридни енергетски систем на сваки сат.



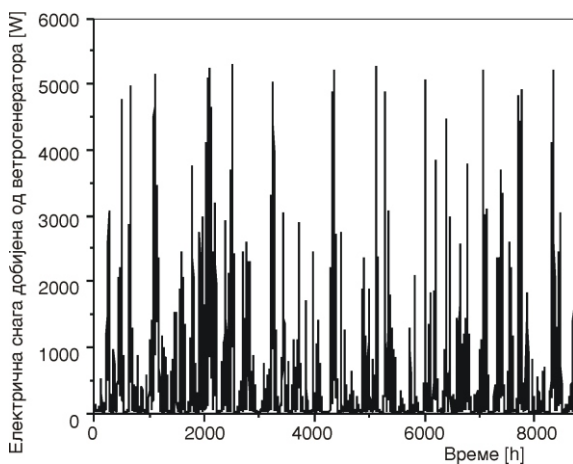
Слика 4. Шема хибридног система фотонапон/ветар који се користи за производњу електричне енергије

Резултати техничке анализе

Техничка анализа енергетског система фотонапон/ветар је рађена за 20 панела (око 25 m²) и за ветрогенераторе од 1 kW, 3 kW и 5 kW. Производња електричне



Слика 5. Добијена електрична снага из фотонапонског система



Слика 6. Добијена електрична снага од ветрогенератора снаге 5 kW

снаге за панеле је дата на сл. 5, а добијена електрична снага од ветрогенератора снаге 5 kW током године је приказана на сл. 6. Максимална добијена електрична снага током године је за летње месеце, приближно 3800 W, док добијена електрична снага од ветра достиже вредност 5400 W. На основу сл. 5 и 6 може да се закључи да је добијена електрична снага од Сунца стабилнија, у смислу мањих одступања током године него добијена електрична снага од ветра. Могуће је постићи константну електричну енергију током целе године додавањем електричних уређаја за складиштење електричне енергије, као што су акумулатори. Такође је могуће користити системе засноване на H₂. Капацитет система за складиштење зависи од бројних фактора, као што су поузданост система, трошкови система и захтеви корисника.

Промена добијене електричне енергије од енергетског система фотонапон/ветар током године је дата на сл. 7. Укупна годишња производња електричне енергије је 8890 kWh_e. У табл. 4 је дата производња електричне енергије за различите конфигурације система.

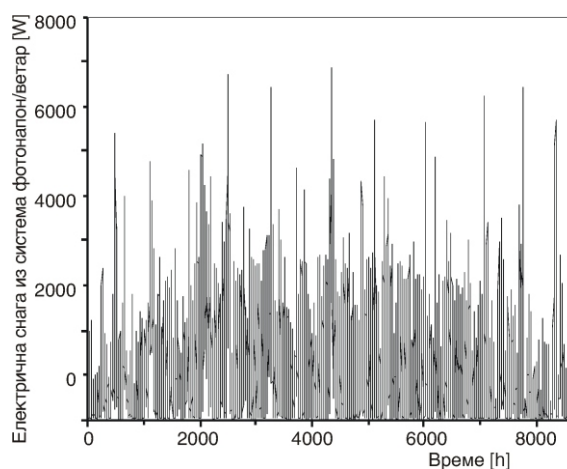
Смањење емисије угљен-диоксида

Сунчева енергија и енергија ветра спадају у најчистије и са еколошког становишта најприхватљивије изворе енергије. Сагоревање фосилних горива доводи до

Таблица 4. Добијена електрична енергија применом енергетског система фотонапон/ветар и смањење емисије CO₂ по години у Београду

| | Фотонапон + 1 kW ветрогенератор | Фотонапон + 3 kW ветрогенератор | Фотонапон + 5 kW ветрогенератор |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| kWh _e | 5943 | 6800 | 8890 |
| tCO ₂ | 7,62 | 8,72 | 11,0 |

значајног загађења животне средине и емисије CO₂, SO₂, NO_x и других гасова ефекта стаклене баште. Они веома лоше утичу на околину изазивајући киселе кише, загађење ваздуха, уништавање озонског омотача и утичу на глобално загревање. Утицај загађивача ваздуха на људско здравље и животну средину, пољопривреду и екосистем је директно повезано са климатским променама и ефектом стаклене баште. У свету је све већи тренд употребе обновљивих извора енергије због негативних утицаја које има сагоревање фосилних горива.



Слика 7. Добијена електрична снага применом енергетског система фотонапон/ветар

У својена доња топлотна моћ за лигнит у Србији на површинским коповима је око 7850 kJ/kg, а емисија угљеника на основу техничке и елементарне анализе угља из колубарског басена је 29,78 tC/TJ [10]. На основу Tier 1. „The Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” методологије за прорачун емисија гасова стаклене баште смањење CO₂ емисије за разматране системе је дат у табл. 4. Добит од уштеде фосилних горива је у директној вези са емисијом CO₂ и на европском тржишту има цену од 21,19 EUR/t CO₂ (мења се током године).

Закључак

У раду је описан и анализиран енергетски систем фотонапон/ветар за домаћинства коришћењем методе динамичке симулације. Пројектовани параметри енергетског система су панели и ветрогенератори. Анализиран је случај реализован коришћењем података за типичну метеоролошку годину за Београд. Динамичка симулација модела је рађена коришћењем рачунарског програма TRNSYS 16. За анализу фотонапонског система изабран је 5-параметарски модел. На основу резултата динамичке симулације добијена је дневна и укупна годишња производња електричне енергије из разматраних комбинованих система. Максимална добијена електрична

енергија за систем фотонапон/ветар са ветрогенератором од 1 kW је 5943 kWh_e, са ветрогенератором од 3 kW је 6800 kWh_e и са ветрогенератором од 5 kW је 8890 kWh_e. На основу урађене техничке анализе добијене су вредности укупне количине електричне енергије за различите конфигурације посматраног система. Такође је дата процена смањења CO₂ емисије за сваки разматрани енергетски систем.

У даљим истраживањима предложених комбинованих система узела би се у обзир дневна (годишња) потрошња електричне енергије изабраног објекта, разматрали би се комбиновани системи са складиштењем водоника H₂ који би се користио за добијање електричне енергије при неповољним метеоролошким условима. У неком од следећих радова ће бити дата техноекономска анализа комбинованих система, а која би имала за циљ избор комбинованог енергетског система са економског и техно-економског становишта.

Захвалност

Овај рад је реализован у оквиру пројекта TP-33036 „Развој новој метеоролошкој мерној стуба за карактеризацију турбулентних параметара ветра”. Аутори рада су захвални Министарству за просвету и науку Републике Србије на финансијској помоћи.

Ознаке

U – брзина ветра, [ms⁻¹]
 z – висина, [m]

Грчки симболи

α – експонент за профил брзине

Литература

- [1] Nema, P., Nema, R. K., Rangnekar, S., A Current and Future State of Art Development of Hybrid Energy System Using Wind and PV-Solar: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8 (2009), 13, 2096-2103
- [2] Arribas, L., Cano, L., Cruz, I., Mata, M., Llobet, E., PV-Wind Hybrid System Performance: A New Approach and a Case Study, *Renewable Energy*, 35 (2010), 1, 128-137
- [3] Celik, A. N., Techno-Economic Analysis of Autonomous PV-Wind Hybrid Energy Systems Using Different Sizing Methods, *Energy Conversion and Management*, 44 (2003), 12, 1951-1968
- [4] Dhrab, S. S., Sopian, K., Electricity Generation of Hybrid PV/Wind Systems in Iraq, *Renewable Energy*, 35 (2010), 6, 1303-1307
- [5] ***, Solar Energy Laboratory, TRNSYS Transient System Simulation Program, Reference Manual, Vol. 5, Mathematical References University of Wisconsin, Madison, Wis., USA, 2003
- [6] Duffie, J. A., Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, USA, 2006
- [7] Ojosu, J. O., Salawu, R. I., An Evaluation of Wind Energy Potential as a Power Generation Source in Nigeria, *Solar Wind Technology*, 7 (1990), 6, 663-673
- [8] <http://www.bergey.com/pages/technical>
- [9] <http://www.dsireusa.org>
- [10] Stefanović, P., et al., The Results of the Laboratory Analysis of the Coal Samples Recovered from the Kolubara Basin, NIV ITE-369, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Vinča, Belgrade, 2008

Abstract

**Technical Analysis of a PV/Wind
Hybrid Energy Conversion System**

by

*Vukman V. BAKIĆ**, *Milada L. PEZO*,
Žana Ž. STEVANOVIĆ, *Marija M. ŽIVKOVIĆ*

**Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

In this paper, a PV/Wind integrated hybrid energy system is analyzed by using dynamical simulation method. The design parameters of PV/Wind are PV panels and wind turbine rotor swept area. The case study is realized by using meteorological data for Typical Metrological Year (TMY) for Belgrade city, Serbia. The simulation model of the system is realized in TRNSYS 16, simulation software. Consequently, the optimum sizes of PV and wind turbine unit are obtained. Reduction of CO₂ emissions is also analyzed in this paper.

Key words: *PV/Wind hybrid system, dynamical simulation, TRNSYS*

*Corresponding author, e-mail: bakicv@vinca.rs

Рад примљен: 21. априла 2011.
Рад ревидиран: 22. јуна 2011.
Рад прихваћен: 29. јуна 2011.